

ノッキングの定量化と ノックインテンシティメータの開発

Quantification of Knocking and Development of Knock Intensity Meter

森 田 照 義*
Teruyoshi MORITA

佐 藤 正 浩*
Masahiro SATO

要 旨

シリンダ内圧信号を一次周波数成分でデジタルフィルタ処理を行い、その最大値および統計処理に基づくノッキング定量化のアルゴリズムと、それをを用いたリアルタイム計測システムを構築した。このシステムでは通常用いられる筒内圧センサのみではなく、気筒毎の計測が可能な座金型センサでも計測可能として高い汎用性を確保することができた。また、処理のほとんどをソフトウェア化し、演算のシンプル化とフラッシュ ROM 内蔵の高性能 MCU 搭載した VME ボードで構成することにより、プログラムの書き換えを可能とした。今後の拡張性から、ベンチ自動計測システムによる自動運転等への対応のため専用インターフェースも有している。

ABSTRACT

An algorithm, which processes pressure signal in cylinder with first frequency element and quantifies it based on its maximum value and statistic processing, and a real time measuring system utilizing the algorithm were established. This system can use plug washer type sensor which can be set on every cylinder as well as a cylinder pressure sensor to secure a high generality. And most of the processing is constructed by software, and renewal of the program was made possible by composing it of the VME board which high performance MCU with built-in flash ROM with simplified operations. Considering the future application, it has a special interface to cope with it to the automatic operation by the bench automatic measuring system and so on, too.

1. まえがき

近年の環境問題対応技術として、各自動車メーカーを中心にガソリン直噴エンジンの開発やハイブリッド自動車への取り組みなど、革新的な燃費性能向上に向けて技術開発にしのぎを削っている。一方、通常のエンジン開発においても、基本的な燃焼特性の改善による燃費向上や排気エミッションの低減が急務である。

こうした技術開発競争下では、これまでとは違った複雑な制御システムや高精度な計測支援技術の開発をとまってしまうのが現状である。

そこで、一般的に内燃機関の燃焼特性の改善に不可欠なノッキングの計測について、従来法と比較しながら定量化による測定精度の向上と、リアルタイム計測および自動運転への適用を考慮した計測システムを開発したので報告する。

2. ノッキング定量化の目的

従来、ノッキングの判定は測定者の感覚(聴覚・視覚)による部分が多かったため、測定者によるバラツキ誤差、テストラボによる差、気象条件による差などがあり、測定精度として十分ではなかった。

また、従来から、筒内圧センサや加速度センサ等を用いてノッキングの定量化は行われてきたが、処理方法が複雑であり、高速な CPU やより多くのメモリが必要であるなど、リアルタイムでノッキング定量化・判定を行うには十分な方法ではなかった。

また、前述のようにエンジン開発においてはシステムの複雑化に伴い、設定すべきパラメータが非常に膨大になっており今後ますますテストの効率化が求められている。

そこで、以下の4点を今回の開発の目的とした。

- 1) ノッキングを定量的に捉える方法を構築する。
- 2) ノッキング測定精度を向上させる。
- 3) リアルタイムでノック判定可能なハードを確立する。
- 4) ベンチ自動計測システムとのインターフェースを有し自動運転を可能とする。

3. 定量化手法

3.1. 定量化のためのセンサ選定

ノッキングを定量化するにあたり第一ステップとしてセンサの選定を行なう必要がある。従来、筒内圧を直接計測する方法、加速度センサによる方法、音による方法等が行われてきたが、筆者らはノッキング定量化のためのセンサ選定のため、ノッキング有無による各センサの出力変化を、点火進角を変化させ周波数解析を行うことにより確認した。

Fig.1 ～ 3 に周波数解析結果を示す。

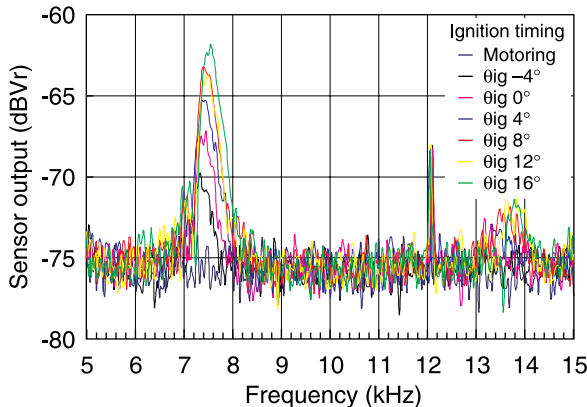


Fig.1 Frequency analysis by cylinder pressure sensor

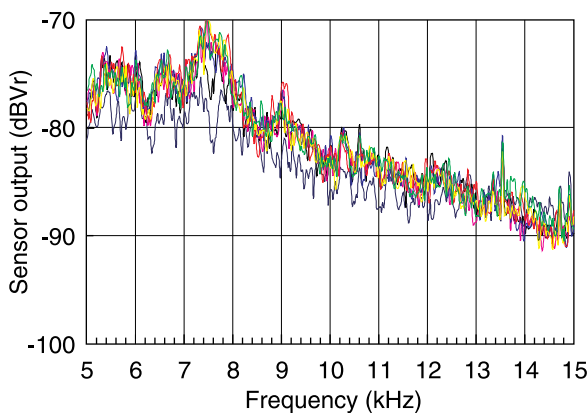


Fig.2 Frequency analysis by air-borne noise

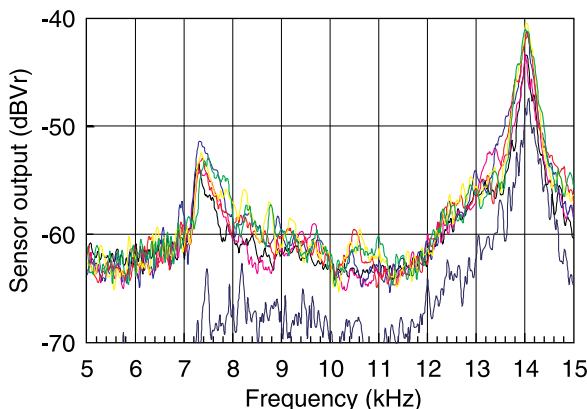


Fig.3 Frequency analysis by plug washer type sensor

各センサとも、ノッキングの主成分である7～8 kHzで、点火進角による出力変化が見られる。また、二次成分である13～15kHz 近辺でも同様の変化が見られる。

周波数解析の結果から、7～8kHzの周波数帯に着目し、点火進角におけるセンサ出力の最大値をまとめた結果をFig.4 に示す。

筒内圧を直接計測する方法は点火時期の進角量とともにセンサー出力も増加しているが、他のセンサでは点火時期進角量とセンサー出力との相関は低い。また、筒内圧センサは、点火時期変化量に対する出力変化量も大きく計測の精度向上が見込まれる。

以上の結果より、ノッキングの定量化に当たっては、筒内圧を直接計測する方法を選択した。

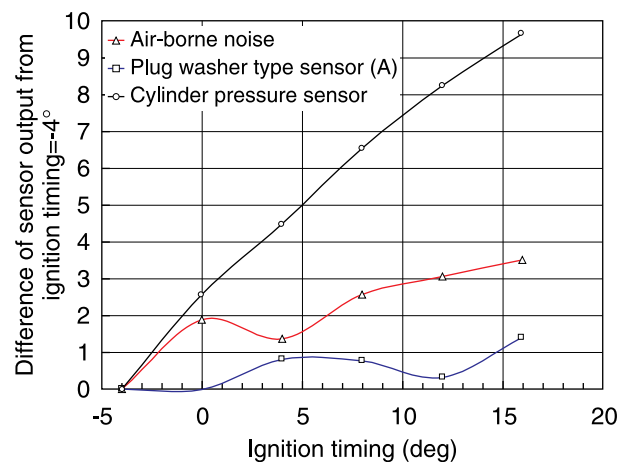


Fig.4 Sensor linearity by ignition timing

3.2. 定量化手法

筒内圧によりノッキングを定量的に捉える方法として、従来熟発生率を積分する方法、筒内圧をフィルタリングしそれを積分する方法等が報告されている^{(1)～(3), (5), (6)}。しかし、これらの方法では処理時間がかかるという問題があり、リアルタイムでモニタするという観点から、望ましい方法ではない。そこで、今回採った方法は、筒内圧をフィルタリングし、その後統計的な処理を行なうことにより、定量化を行う方法を採用した。Fig.5 にそのフローを示す。

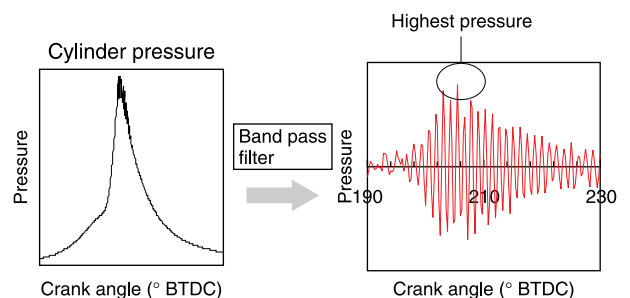


Fig.5 Analysis flow

フィルタリング後の波形に着目した場合、Fig.6 に示すように、「最大値」、「振幅」、「最大値 - 最小値」等で処理する方法が挙げられる。これらの方法により、点火進角を変化させた場合、Fig.7に示すように、いずれの方法でも点火進角に対し出力は一意の関係にあり、どの方法でもノッキングを定量的に捉えることが可能である。

筆者らはもっとも処理がシンプルな「最大値」による方法を採用した。この最大値はノッキングの強さを表現すると考えられるため、この値をノック インテンシティと定義することにした。

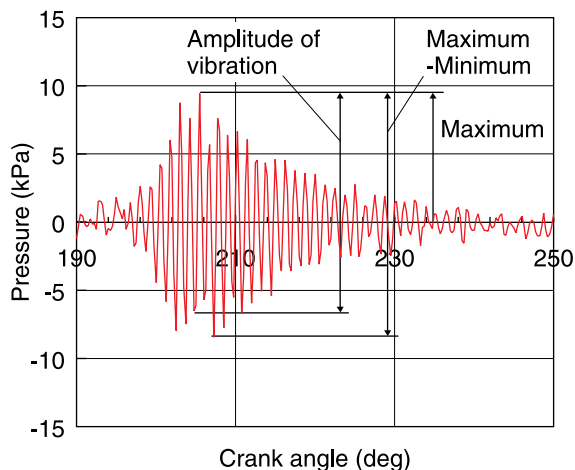


Fig.6 Parameter of knocking identification

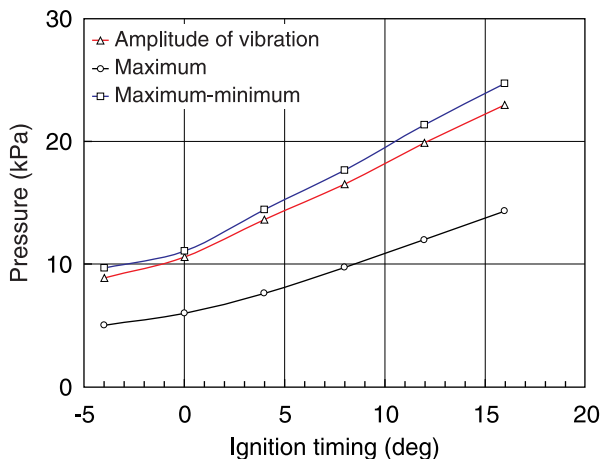


Fig.7 Comparison of analysis method

3.3. ノッキングの強度と頻度

ノッキングを人間が評価する場合、印象でとらえてしまうことが考えられる。具体的には、ヘビーノックが一度だけ発生した場合も、軽ノックが常時発生している場合も、同様に「ノッキングが発生している」ととらえてしまう。したがって、ノッキングを定量化する場合、強度と頻度を考慮する必要がある。

Fig.8 に、100 サイクルサンプルした場合の点火進角量によるノックインテンシティの平均値と標準偏差を示す。

点火時期を進角して行った場合、ノックインテンシティの平均値は増加している。これは点火進角により強いノッキングが発生していることを意味する。同様にノックインテンシティの標準偏差に着目すると、平均値と同様に点火進角により増加している。

Fig.9 に上記の場合において、横軸にノックインテンシティを取った場合の頻度分布を示す。点火進角によりノックインテンシティの値が判定値を超えるサイクル数が増加している。これは、ノッキングが発生している頻度(サイクル数)が増加していることを意味する。

以上より、ノッキングの判定は筒内圧をバンドパスフィルタリングしその最大値(ノックインテンシティ)に着目することで可能となる。

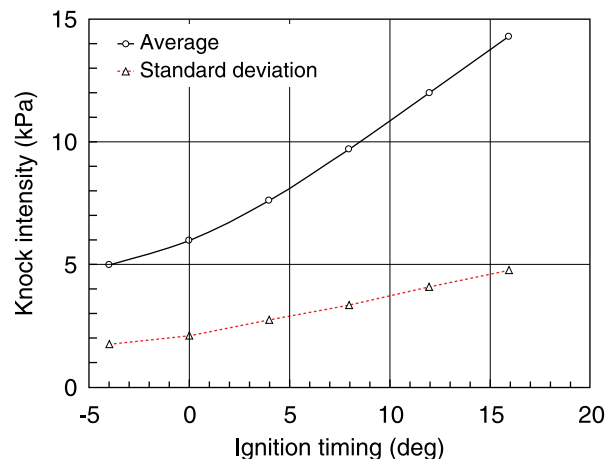


Fig.8 Average standard deviation of knock intensity

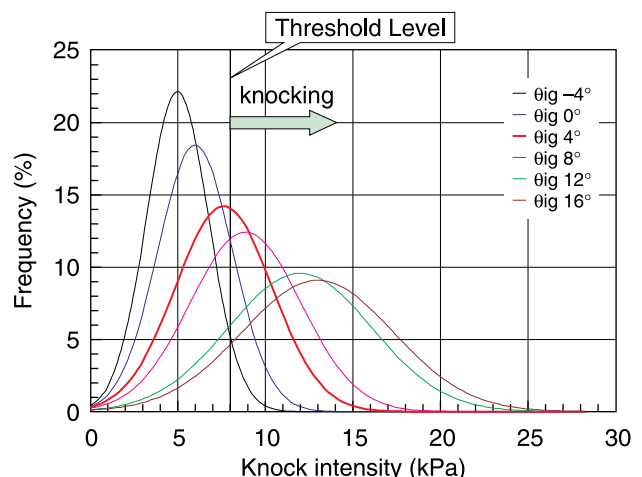


Fig.9 Distribution of knock intensity

3.4. ノッキング判定レベルの設定

ノッキングの判定は従来テスト者の感覚(聴覚・視覚)により行っていたので新たなノッキング判定方法を適用する場合でも従来手法と相関をとる必要がある。

Fig.10 にエンジン回転数ごとのノッキング判定レベルを示す。判定レベルはエンジン回転とともに上昇しているが、これは、聴覚と相関を取っているため回転の上昇に伴い、バックグラウンドノイズが上昇するためである。

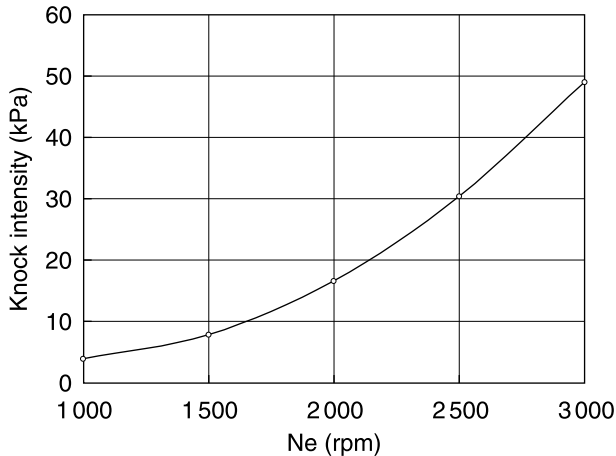


Fig.10 Threshold level table

3.5. 定量化手法の検証

これまで述べてきたノックインテンシティによりノッキングの定量化を用い、検証を行なった。検証方法はエンジンの仕様・機種・運転条件等を変化させて行っている。

一例を Fig.11 に示す。検証方法は、Ne=1500rpm, WOT において、A/F を変化させた時、ノッキングが発生する点火時期差により行った。

結果として図に示すように判定レベルで、A/F 違いにより 2° の差が生じているが、これは聴覚で判定したノッキング差と一致している。したがって、この定量化方法は従来の判定手法と高い相関を示しており、ノッキングの判定が出来る。

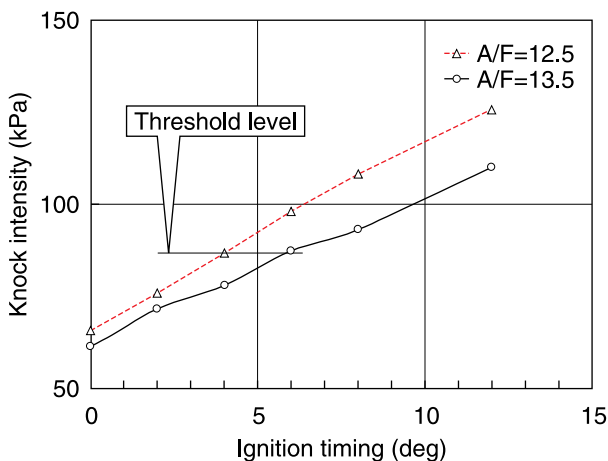


Fig.11 Verification of quantificational method

4. プラグ座センサによるノッキング判定

車載状態でのノッキング判定や全気筒同時計測等を行うためには筒内圧センサを全気筒に取り付ける必要がある。しかしながら、筒内圧センサを多気筒エンジンの全気筒に取り付けることは、多弁化、低ボアピッチ化等により困難である。そこで、プラグ座センサを用いた判定手法の検討を行った。この場合、筒内圧センサと同様の判定手法をそのまま適用しても、センサのS/Nが悪いため点火時期による出力差が明確にならないという問題がある。

そこで、プラグ座センサを用いた場合は、筒内圧センサを用いた時の様に平均化するのではなく、各サイクルに着目してある一定値を超えたサイクル数をカウントし、その頻度により判定する方法を採用した。ノックインテンシティによる方法との比較を Fig.12 に示す。頻度による判定法も、点火進角に対し一意の関係にあり、ノッキングの判定が可能であることが分かる。

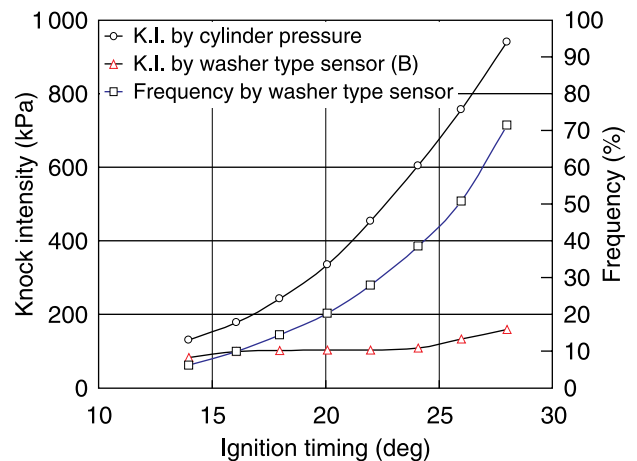


Fig.12 Comparison of quantificational method

5. システム構成

5.1. 概要

システムブロックダイアグラムを Fig.13 に示す。前述の目標に従い、システムに要求される機能の大半をソフトウェアで実現した。また、Fig.14 では、あるサイクルにおいて、点火信号とセンサ信号により、計測タイミングを決定し、バンドパスフィルタリング、最大値(ノックインテンシティ)の検出までを時系列で示す。

5.2. ハードウェア

ハードウェア基本構成を Fig.15 に示す。本システムは、図中の機能をダブルハイトの2スロットサイズに納めたVMEボードにて実現し、このボード4枚をVMEラックに収納した。ボード1枚につき1気筒の計測に対応し、本シス

テム全体で4気筒分の計測が可能である。その外観を Fig.16 に示す。

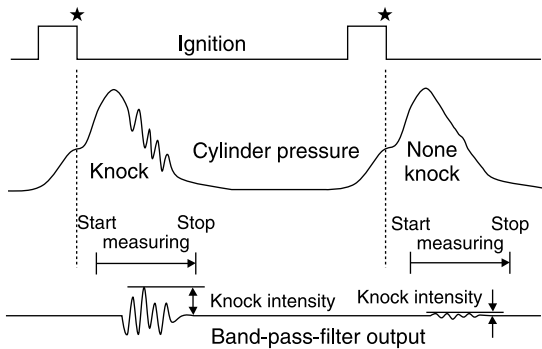


Fig.14 Timing chart of measuring signals



Fig.16 Appearance of knock intensity meter

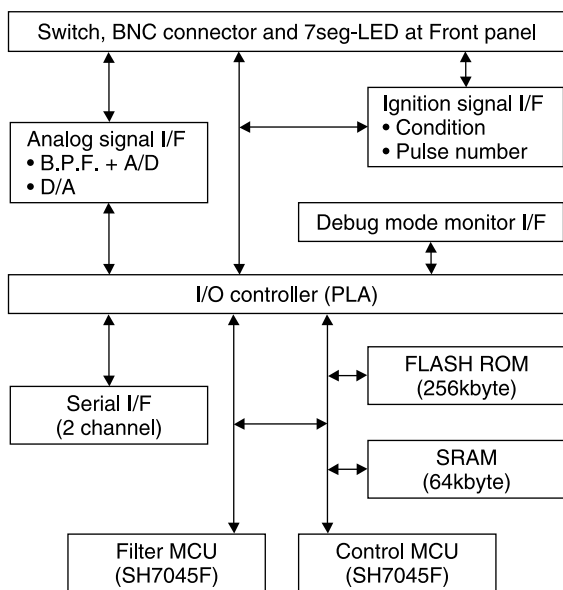


Fig.15 Constitution of hardware

5.2.1. 点火信号インターフェース

点火方式および配電方式の違いに対応するため、信号レベルとパルス数を選択可能にした。

信号レベルは、以下の選択が可能である。

- ・ バッテリ電圧レベル(点火エッジ：立ち下がり)
- ・ バッテリ電圧レベル(点火エッジ：立ち上がり)
- ・ TTL レベル(点火エッジ：立ち下がり)
- ・ TTL レベル(点火エッジ：立ち上がり)
- ・ 点火コイル2次側ピックアップ信号

パルス数は、以下の選択が可能である。

- ・ 気筒別のトリガ(DLI またはデистриビュータ配電の2次側ピックアップ)：1pulse/720°
- ・ 同爆点火システムのトリガ：2pulse /720°

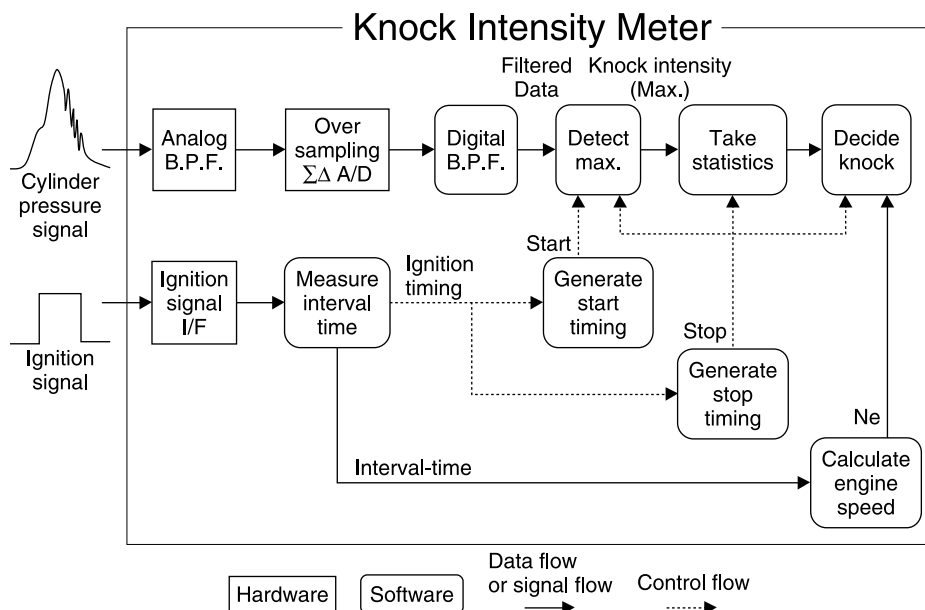


Fig.13 System diagram of knock intensity meter

・同爆点火システムの(反対側気筒の)トリガ: 2pulse/720°

・2ストロークエンジンのトリガ: 1pulse/360°

また、エンジン回転数の算出等に使用するため、パルス数設定をプロセッサで認識する。

5.2.2. センサ信号インターフェース

アナログフィルタは、燃焼サイクルによる信号をキャンセルするためのハイパスフィルタ(1kHz〜)と、エリアシング歪み防止のローパスフィルタ(〜100kHz)をカスケード接続した。いずれのフィルタも低次のCRフィルタで実現し、ジャンプスイッチによりキャンセルすることも可能である。また、両フィルタの間にゲイン可変(0.1 ~ 10)のアンプを搭載した。

AD コンバータは、アンチエリアシングフィルタを簡略化可能なオーバーサンプリングΣΔ変調方式を採用し、精度は16bit、入力レンジは-2 ~ +2V、サンプリングレートは25KHzと50kHzの切替可能である。

また、デジタルフィルタの係数切替を行うために、サンプリングレートの設定をプロセッサで認識する。

5.2.3. データディスプレイインターフェース

単独で計測するため、7セグメントLEDを搭載した。予め用意されたデータ群(ノックインテンシティあるいはノック頻度等)から一つをスイッチで選択し、物理量を表示する。

5.2.4. ノックステータスインターフェース

既存の設備および計測器等に接続するため、ノック判定結果に応じたTTL出力およびLED出力と、ノックインテンシティに応じたアナログ出力を行うために、12bit D/Aコンバータ(出力レンジ: 0 ~ 5V)を搭載した。これにより、自動運転中のインタロックなどに利用可能である。

5.2.5. シリアル通信インターフェース

パーソナルコンピュータ等で計測結果を取り込むため、2系統のシリアル通信インターフェースを用意した。一方のシリアル通信インターフェースは、ネットワーク型に接続が可能であるため、複数のノックインテンシティメータからの計測結果を1台の通信端末で取り込むことが可能である。

5.2.6. スイッチ信号インターフェース

センサタイプ選択スイッチ入力、チャージアンプ出力であるか、点火プラグ座金センサ出力であるかをプロセッサで認識する。これにより、デジタルフィルタの通過域と、ノック判定アルゴリズムの切替を行う。

外部スイッチ入力、ノック判定値の書き換え、または初期化(出荷時の設定に戻す)を行う場合のトリガとして、プロセッサで認識する。

5.2.7. プロセッサ

フラッシュROMを内蔵した一般的なマイクロプロセッサを2個(同一のMCU)を搭載し、デジタルフィルタリングと最大値(ノックインテンシティ)の検知までを実現する

サブプロセッサと、それ以外全てを実行するメインプロセッサに機能を分割した。プログラムは全てプロセッサ内蔵のフラッシュROMにアサインされており、メイン・サブいずれも、フラッシュライタによってプログラムの書き換えが可能である。メイン・サブのプロセッサ間はパラレルで接続し、相互監視を行う。

また、ノック判定値、フィルタ係数などの定数データを外部のフラッシュROMにアサインすることによって、外部スイッチをトリガにしたノック判定値の書き換え・初期化と、メンテナンス用にパーソナルコンピュータを接続して任意の定数データを変更することに対応した。

5.3. ソフトウェア

前出の Fig.13 に示さなかったソフトウェア処理を含めて、各処理の概要を本節で示す。また、本システムは複数の外部イベントに同期して処理を行う必要があり、タスク管理などのためにμITRON 準拠のリアルタイムOSを搭載した。

5.3.1. パルス処理

点火トリガに同期して、エンジン回転数の算出、計測タイミング(開始・終了)の生成を行う。計測開始タイミングは、点火トリガ発生後の所定時間経過を検知し、計測終了タイミングは、点火トリガ発生後の所定クランク角度経過を検知する。エンジン回転数の算出と計測終了タイミング生成は、点火信号インターフェースのパルス数設定に応じて、点火パルス1周期に応じたクランク角度を考慮して処理を行う。ただし、計測開始・終了タイミングを実際に生成する場合には、信号処理のディレイを考慮しなければならない。このディレイは、エンジン回転数に応じて影響が大きくなるため、開始・終了共にディレイ時間を加算して、タイミングを生成した。Fig.17 に機能として必要とされる(理想的な)計測タイミングと、ディレイを考慮した(実際の)計測タイミングの比較を示す。

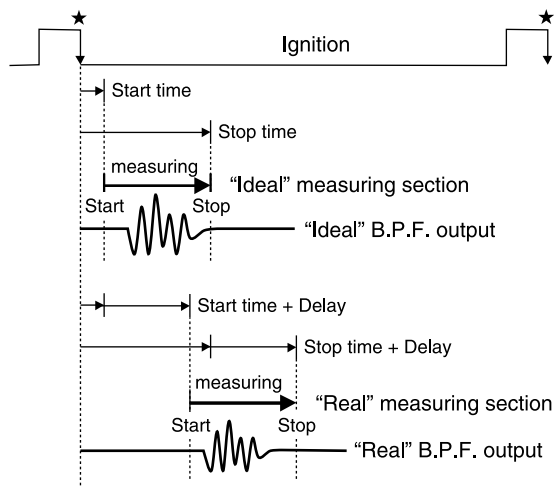


Fig.17 Measuring section

5.3.2. デジタル信号処理

25kHz または 50kHz サンプリングで、最大 63 次程度の FIR フィルタリングおよび最大値(ノックインテンシティ)の更新を行う。フィルタ係数は、サンプリング周波数およびセンサタイプ選択スイッチの組み合わせにより、あらかじめ設定した4種から選択する。

5.3.3. 統計処理とノック判定

前述の最大値に対して、所定サイクル区間で、統計処理(平均値、標準偏差、ピーク値、ノック頻度等)を行う。さらに、ノック判定値と統計処理の算出結果によって、最終的なノック判定を行う。

5.3.4. 各出力手段の処理

操作対象は、データディスプレイインターフェースとノックステータスインターフェースである。

データディスプレイインターフェースは、表示データ選択スイッチに応じて下記から1つを選択して表示する。

- ・統計処理の算出結果
- ・ノック判定値
- ・エンジン回転数

ノックステータス I/F は、ノックインテンシティの D/A 出力とノック判定結果に応じた TTL 出力を行う。

このインターフェースにより自動計測システムとの通信を行い、自動運転への対応が可能となる。

5.3.5. 外部フラッシュ ROM の書き換え

定数データを格納した外部フラッシュ ROM を書き換えるために、下記2種の手段を用意した。

- ・外部スイッチによる
- ・パーソナルコンピュータの接続による

外部スイッチによる外部フラッシュ ROM の書き換えは、ノック判定値に対して、通常動作中には更新、立ち上げ時には初期化(出荷時設定に戻す)を行う。例えば、通常動作中に外部スイッチをONすると、ノック判定値の内容を、新たに算出した判定値に入れ替えることが可能である。

パーソナルコンピュータの接続による外部フラッシュ ROM の書き換えは、メンテナンス用に全ての定数データを対象にした。例えば、計測対象であるエンジンの変更、またはセンサを入れ替えるなどにより、ノック共振周波数が変化した場合は、パーソナルコンピュータを介して新たに設計した FIR フィルタ係数を変更することが可能である。

6. まとめ

- 1) 筒内圧センサ信号をバンドパスフィルタを通し、その最大値をノックインテンシティと定義することで、ノッキングの定量化を行った。
- 2) ノッキングを定量化したデータは、聴覚によるテスト結果と相関があり、判定まで可能であることを確認した。

- 3) ノッキングの定量化と判定を、最大値のみに着目することで処理を簡素化し、リアルタイムで実行する計測システムを開発した。またこの計測システムはタイミング信号として各種点火信号等に対応しており、使用可能なセンサも筒内圧センサだけでなくプラグ座金型のセンサにも対応しており、システムとして高いはん用性を持っている。
- 4) ノッキングの強度およびノッキングの判定フラグを出力するインターフェースを有し、自動運転・自動マッピングへの対応が可能となった。

謝 辞

計測システムの開発にご協力頂いた(株)アドテックシステムサイエンス様に紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 岩切保憲, 小泉鎌一: 熱発生量を用いたサイクル毎のノッキング検出法, 自動車技術会論文集 Vol.23, No.3, p.3.85-3.88 (1992)
- (2) 岩切保憲, 小泉鎌一: 熱発生量を用いたサイクル毎のノッキング検出法, 自動車技術会 学術講演会前刷集 912, p.33-37 (1991)
- (3) 竹村純, 神品英一, 浅子光: 燃焼モードに基づくノックインデックスを用いた過渡ノックの解析, 内燃機関 29 巻9号, p.54-64 (1996)
- (4) 森田照義, 佐藤正浩: ノッキングの定量化とノック・インテンシティ・メータの開発, 日本機学会 関東支部 ブロック合同講演会講演論文集 [No.990-2], p39-40 (1999)
- (5) Checkel M. D., Dale J. D.: Computerized Knock Detection from Engine Pressure Records, SAE-Paper 860028
- (6) Gschweidl K., Gotthard E. and Kampitsch A.: Real Time Knock Analysis for Automatic Engine Mapping and Caribration, AVL List GmbH

■著 者■



森田 照義



佐藤 正浩